

PERPINDAHAN PANAS PADA ALAT PENUKAR PANAS UNTUK MENYIMPAN PANAS LATEN

Panut Mulyono¹⁾ dan Suhanan²⁾

ABSTRACT

An experimental study to investigate the heat transfer rate and to calculate the total energy that can be stored in a heat exchanger for latent heat thermal energy storage system using the latent heat of fusion of a phase change material (PCM) has been carried out in this study. The heat storage container is a double pipe heat exchanger where the energy source fluid (hot water) flows through the inner tube (copper, of inside diameter of 12.5 mm, outside diameter of 16 mm and length of 149.5 cm), while the heat sink (storage PCM) fills the annular gap (outer tube made of PVC with inside diameter of 78 mm and thickness of 6 mm). The PCM used in this experiments is the paraffin wax with melting temperature of 44°C. Measurements were made of the temperature change of the hot water as well as of the paraffin wax. The heat transfer rate and the accumulative energy stored as a function of time was evaluated for different hot water flow rates and inlet temperatures. The melting rate of the PCM was also investigated visually.

The experimental results with the parameter of hot water mass flow rates show that the heat transfer rate increases 181% at the time of 50 minutes from the initial process by increasing the hot water mass flow rate from 0.00764 kg/sec to 0.0221 kg/sec for the water inlet temperature of 70°C. The heat transfer rate at 50 minutes from the initial process for the experiment using hot water mass flow rate of 0.0221 kg/sec increases 97.2% by increasing the hot water inlet temperature from 60°C to 70°C. The accumulated energy stored at the PCM also increases by increasing the hot water mass flow rate for a constant inlet temperature and/or increasing the inlet temperature for a constant mass flow rate. The results of the visual investigation of the melting rate of PCM show that convection in the molten zone was found to be an important parameter affecting the heat exchanger performance.

PENGANTAR

Penyimpanan energi panas sering kali harus dilakukan, karena pada saat suatu sumber mengeluarkan energi tersebut, kebutuhan untuk menggunakannya terjadi pada waktu lain. Sebagai contoh, energi panas matahari yang dipancarkan pada siang hari dapat disimpan untuk digunakan pada malam hari, misalnya untuk pemanasan air. Secara tradisional, energi panas tersebut disimpan dalam bentuk panas sensibel, misalnya untuk menaikkan suhu air, batu, dll. Tetapi penyimpanan dalam bentuk panas sensibel banyak menghadapi masalah dalam perancangan dan pengoperasian alatnya. Usaha-usaha untuk mencari sistem penyimpanan yang lebih baik telah banyak dilakukan, diantaranya adalah menggunakan panas laten peleburan dari PCM (Yanadori dan Masuda, 1986; Ryu dkk, 1991). Penggunaan PCM sebagai media penyimpan panas mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya adalah PCM menggunakan panas laten yang jauh lebih besar dibandingkan dengan panas sensibel dan pada waktu membebaskan panas terjadi pada suhu yang tetap.

Kerugian penggunaan PCM sebagai media penyimpan panas adalah rendahnya kecepatan peleburan dan pembekuan karena rendahnya konduktivitas panas dari PCM. Secara umum unjuk kerja sistem penyimpan panas menggunakan PCM dipengaruhi oleh parameter-parameter sebagai berikut : (1) sifat-sifat termofisis dari PCM, (2) kecepatan perpindahan panas pada proses peleburan dan pembekuan, (3) konfigurasi bahan dan luas transfer panas, dan (4) kecepatan aliran massa dan sifat-sifat termofisis dari media transfer panas. Lagipula suhu, kecepatan transfer panas, dan energi yang tersimpan secara akumulatif berubah sebagai fungsi waktu serta posisi dan hal ini mempengaruhi unjuk kerja sistem.

Kecepatan transfer panas pada sistem ini dapat sedikit dinaikkan dengan usaha meningkatkan koefisien perpindahan panas *overall*. Usaha meningkatkan koefisien perpindahan panas *overall* dengan cara memberi sirip-sirip pada tabung dimana PCM ditempatkan dan dengan cara memasukkan potongan-potongan besi pada PCM telah diteliti oleh Watanabe dkk (1993).

¹⁾ Ir. Panut Mulyono, M.Eng., D.Eng., Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM

²⁾ Dr. Ir. Suhanan, DEA., Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UGM

Perbedaan suhu yang cukup besar antara PCM dan fluida transfer panas juga mempengaruhi kecepatan perpindahan panas dari PCM ke fluida transfer panas atau sebaliknya. Farid dkk (1989, 1990) telah mengusulkan penggunaan PCM dengan perbedaan suhu leleh untuk sistem penyimpan panas ini dengan udara sebagai fluida transfer panas. Karena tahanan transfer panas pada udara cukup besar, maka pada sistem ini kecepatan pelelehan dan pembekuan PCM cukup kecil. Untuk memperbesar kecepatan pelelehan dan pembekuan pada sistem ini, Watanabe dkk (1993) telah mengganti udara sebagai fluida transfer panas dengan air.

Aspek-aspek perancangan dan unjuk kerja, yaitu kecepatan transfer panas dari fluida ke PCM atau sebaliknya merupakan hal yang sangat penting pada sistem penyimpanan panas dengan PCM, karenanya hal tersebut perlu mendapatkan perhatian. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari kecepatan perpindahan panas pada alat penukar panas yang digunakan sebagai *thermal energy storage (TES) system* dan menghitung akumulasi panas yang dapat disimpan pada sistem tersebut. Alat penukar panas yang dipelajari berupa pipa dobel dimana fluida yang digunakan sebagai sumber energi (air panas) mengalir dalam pipa sedangkan penerima panas (PCM) ditempatkan pada anulus. PCM yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis lilin dengan titik leleh 44°C. Peubah-peubah yang dipelajari adalah kecepatan aliran massa air panas dan suhu masuknya pada alat penukar panas. Kecepatan peleburan PCM diamati secara visual.

CARA PENELITIAN

Bahan. PCM yang dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini adalah *paraffin wax*, dengan

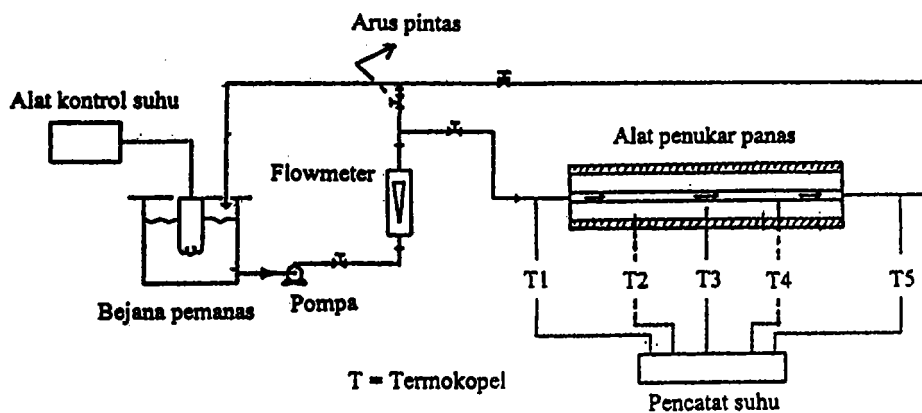
pertimbangan harganya lebih murah dibandingkan dengan zat-zat organik lain, tidak rusak karena proses pelelehan dan pembekuan berkali-kali, dan tidak korosif terhadap logam. Bahan tersebut dibeli di Toko Tekun Jaya, Jl. Suryatmajan No. 55 Yogyakarta dengan sifat-sifat termofisis seperti ditunjukkan pada tabel I dalam bandingannya dengan sifat-sifat termofisis air.

Tabel I. Sifat-sifat termofisis *paraffin wax*.

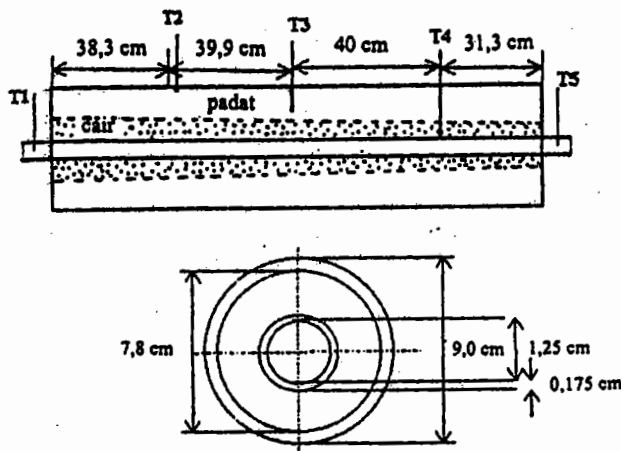
Sifat-sifat termofisis	<i>Paraffin wax</i>	Air
Suhu leleh, T_m (°C)*	44	
Panas laten peleburan, L (kJ/kg)	168	
Berat jenis, ρ_s, ρ_l (kg/m ³)*	830,9; 777,8	997
Konduktifitas panas, k_s, k_l (W/m°C)	0,4; 0,15	0,65
Kapasitas panas, C_s, C_l (kJ/kg°C)	2,052; 2,411	4,18

* Diukur

Alat. Skema alat penelitian ditunjukkan pada gambar 1 dan sistem penyimpan panasnya digambarkan secara rinci pada gambar 2. Bejana pemanas air terbuat dari ember dengan volum 10 liter yang dilengkapi dengan pemanas listrik 1000 W dan sebuah termostat yang digunakan untuk mengontrol suhu air. Sistem penyimpan panas berbentuk alat penukar panas pipa dobel dimana air mengalir dalam pipa bagian dalam sedangkan PCMnya menempati anulus diantara dua pipa. Pipa bagian dalam terbuat dari pipa tembaga dengan diameter dalam 12,5 mm dan ketebalan 1,75 mm. Pipa bagian luar terbuat dari pipa PVC dengan diameter dalam 78 mm dan ketebalan 6 mm. Panjang efektif alat penukar panas tersebut 149,5 cm. Suhu pada PCM diukur dengan 3 buah termokopel yang ditempatkan pada posisi yang berbeda arah aksial dan radial dari alat penukar panas. Suhu air masuk dan keluar alat penukar panas juga diukur dengan termokopel.



Gambar 1. Skema alat penelitian.



Gambar 2. Detail alat penyimpan panas.

Percobaan. Sebelum percobaan dilakukan, PCM harus berada pada suhu awal tertentu. Dalam hal ini, suhu PCM dikondisikan sama dengan suhu lingkungan. Caranya adalah setiap akhir percobaan, PCM dibekukan dengan cara mengalirkan air dingin untuk mengambil panas dari PCM dan setelah itu dibiarkan selama satu malam. Untuk memulai percobaan, air panas dipertahankan pada suhu tertentu dan debitnya juga dipertahankan tetap dengan cara mengalirkan air panas tersebut melewati flowmeter lalu mengembalikannya ke bejana pemanas dengan menutup kran yang menuju alat penukar panas. Setelah kondisi di atas tercapai, maka tes untuk *charging* (menyimpan energi panas) dapat dilakukan dengan memindahkan aliran air panas ke alat penukar panas lalu mengembalikannya ke bejana pemanas. Kecepatan aliran massa air, suhu air masuk dan keluar alat penukar panas, serta suhu PCM semuanya diukur sebagai fungsi waktu. Kecepatan transfer panas dari air ke PCM dihitung dari perubahan entalpi air masuk dan keluar alat penukar panas. Dengan mengetahui perubahan suhu air keluar alat penukar panas sebagai fungsi waktu, maka jumlah energi panas yang tersimpan di PCM dapat dihitung.

Kecepatan transfer panas sebagai fungsi waktu dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

$$Q(t) = \dot{m} C_w [T_1 - T_5(t)] \quad (1)$$

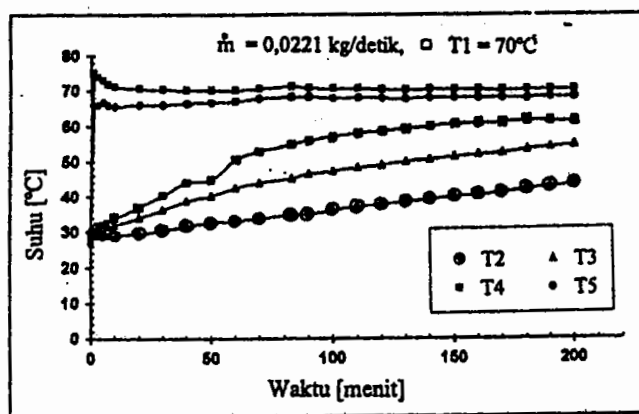
Energi panas akumulatif yang tersimpan di PCM $E(t)$ dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan (1) terhadap waktu. $E(t)$ dapat juga ditunjukkan dengan persamaan berikut.

$$E(t) = \rho_p V_p [C_p (T_m - T_i) + L] + (M C)_{wall} (T_m - T_i) \quad (2)$$

Unjuk kerja alat penukar panas untuk menyimpan panas laten ini ditunjukkan oleh $Q(t)$ dan $E(t)$ sebagai fungsi waktu. Energi panas akumulatif yang tersimpan di PCM, $E(t)$ dihitung dengan mengintegrasikan persamaan (1) terhadap waktu dengan cara Gauss.

HASIL DAN PEMBAHASAN

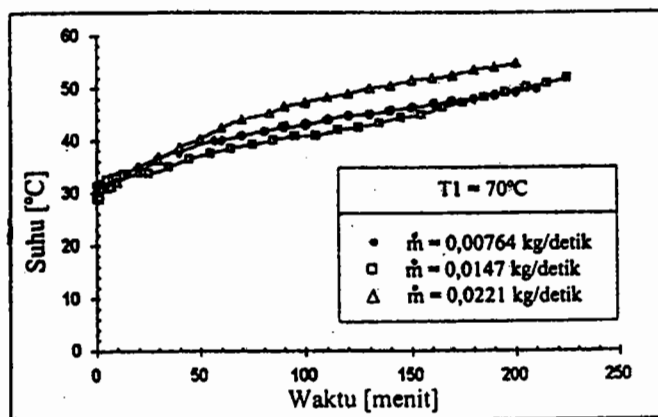
Suhu terukur pada masing-masing posisi (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , dan T_5) sebagai fungsi waktu untuk salah satu kondisi operasi (kecepatan aliran massa air 0,0221 kg/detik dengan suhu masuk alat penukar panas 70°C) ditunjukkan pada gambar 3. Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa perbedaan/selisih antara suhu air masuk (T_1) dan suhu air keluar (T_5) pada awal proses cukup besar tetapi selisih itu makin lama makin kecil (ΔT pada waktu 10 menit adalah 5,5°C dan ΔT pada waktu 150 menit adalah 2,25°C). Hal ini menunjukkan bahwa pada awal proses kecepatan transfer panas dari air ke PCM cukup besar tetapi makin lama makin kecil. Menurunnya kecepatan perpindahan panas sebagai fungsi waktu ini disebabkan oleh naiknya suhu PCM seperti ditunjukkan suhu pada posisi T_2 , T_3 , dan T_4 sehingga memperkecil perbedaan antara suhu air dan suhu PCM yang merupakan daya dorong terjadinya transfer panas.



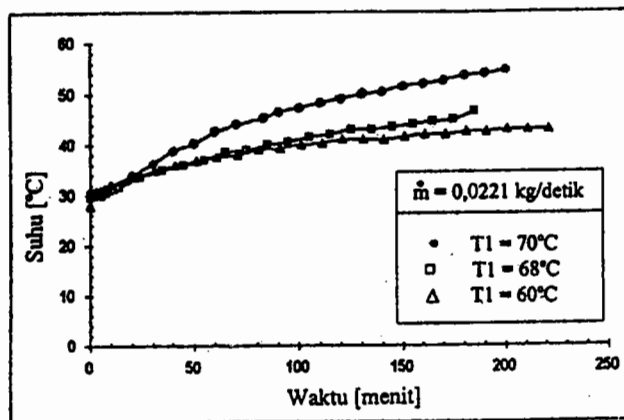
Gambar 3. Hubungan antara suhu dan waktu.

Gambar 4 menunjukkan suhu PCM pada posisi T_3 sebagai fungsi waktu untuk suhu air masuk 70°C dengan kecepatan aliran massa yang berbeda. Gambar 4 menunjukkan bahwa makin besar kecepatan aliran massa air maka pada waktu dan posisi yang sama suhu PCM makin besar (pada waktu 100 menit : $\dot{m} = 0,00764$ kg/detik, $T_3 = 43^\circ\text{C}$; $\dot{m} = 0,0221$ kg/detik, $T_3 = 47,3^\circ\text{C}$). Hal ini menunjukkan bahwa makin besar

aliran massa makin besar pula kecepatan transfer panas dari air ke PCM karena makin besar kecepatan aliran massa berarti kondisi alirannya makin turbulen dan mengakibatkan naiknya koefisien perpindahan panas konveksi keseluruhan. Gambar 5 menunjukkan suhu PCM pada posisi T3 sebagai fungsi waktu untuk kecepatan aliran massa air 0,0221 kg/detik dengan suhu masuk yang berbeda-beda. Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa makin besar suhu air masuk alat maka untuk waktu dan posisi yang sama suhu PCM makin besar (pada waktu 100 menit : $T_1 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = 40^\circ\text{C}$; $T_1 = 68^\circ\text{C}$, $T_3 = 41^\circ\text{C}$; $T_1 = 70^\circ\text{C}$, $T_3 = 47,3^\circ\text{C}$). Hal ini menunjukkan bahwa makin besar suhu air masuk alat makin besar pula kecepatan transfer panas dari air ke PCM karena perbedaan suhu air dan suhu leleh (titik lebur) PCM semakin besar dan perbedaan ini merupakan daya dorong untuk perpindahan panas.



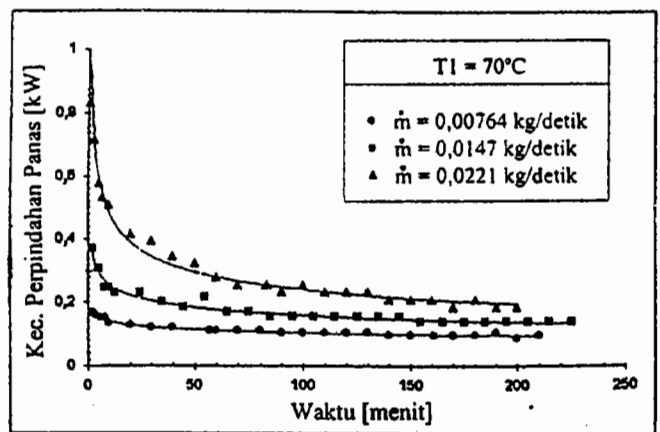
Gambar 4. Pengaruh kecepatan aliran massa air pada kenaikan suhu PCM (T_3).



Gambar 5. Pengaruh suhu air masuk pada kenaikan suhu PCM (T_3).

Pengaruh kecepatan aliran massa air terhadap kecepatan perpindahan panas untuk suhu air masuk 70°C dihitung dengan persamaan 1 dan hasilnya ditunjukkan pada gambar 6. Dari gambar 6 dapat

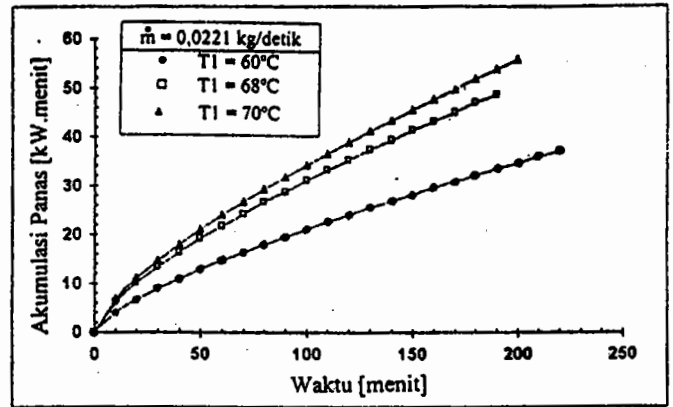
dilihat bahwa makin besar kecepatan aliran massa air makin besar pula kecepatan perpindahan panasnya karena turbulensi aliran air di dalam pipa makin besar sehingga koefisien perpindahan panas konveksinya makin besar. Pada awal proses perbedaan kecepatan perpindahan panas sebagai fungsi perbedaan kecepatan aliran massa cukup besar tetapi perbedaan itu menurun dengan bertambahnya waktu. Untuk ketiga kecepatan aliran massa air, kecepatan perpindahan panas pada awal proses cukup besar dan makin lama makin kecil sampai akhirnya tetap. Dengan menaikkan kecepatan aliran massa air panas dari 0,00764 kg/detik menjadi 0,0221 kg/detik dapat menaikkan kecepatan perpindahan panas sebesar 181% pada waktu 50 menit dari awal proses. Gambar 7 menunjukkan pengaruh suhu air masuk terhadap kecepatan perpindahan panas untuk kecepatan aliran massa air 0,0221 kg/detik. Makin besar suhu air masuk, makin besar pula kecepatan perpindahan panasnya karena makin besar perbedaan antara suhu air dan titik lebur PCM. Untuk ketiga suhu yang berbeda, kecepatan perpindahan panasnya mempunyai kecenderungan yang sama, yaitu cukup besar pada awal proses dan makin lama makin kecil serta akhirnya relatif tetap. Dengan menaikkan suhu air masuk dari 60°C menjadi 70°C dapat menaikkan kecepatan perpindahan panas sebesar 97,2% pada waktu 50 menit dari awal proses.



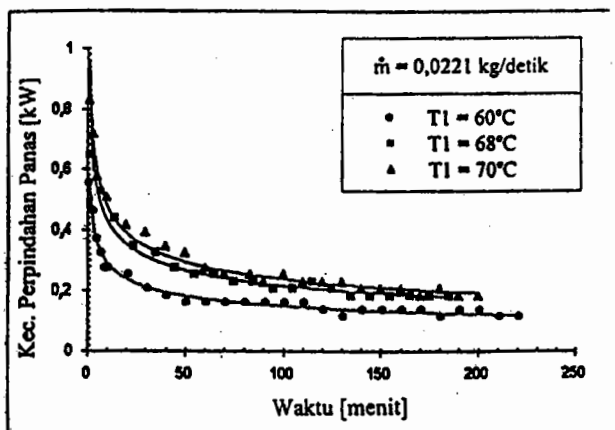
Gambar 6. Pengaruh kecepatan aliran massa air terhadap kecepatan perpindahan panas.

Akumulasi panas yang tersimpan dalam alat penyimpan panas sebagai fungsi waktu dihitung dengan mengintegrasikan persamaan 1 dengan cara Gauss. Hasil perhitungan untuk variasi kecepatan aliran massa air dengan suhu masuk 70°C dilukiskan pada gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa makin tinggi kecepatan aliran massa airnya makin besar pula

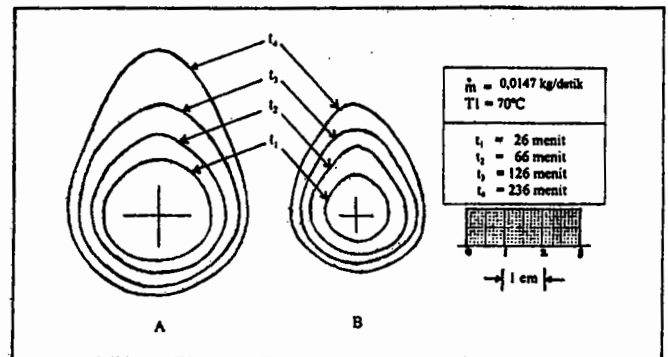
akumulasi panasnya (pada waktu 100 menit : $\dot{m} = 0,00764$ kg/detik, $E(t) = 12,03$ kW.menit; $\dot{m} = 0,0147$ kg/detik, $E(t) = 20,01$ kW.menit; $\dot{m} = 0,0221$ kg/detik, $E(t) = 34,23$ kW.menit) karena kecepatan perpindahan panasnya makin besar dengan naiknya kecepatan aliran massa air. Gambar 9 menunjukkan akumulasi panas sebagai fungsi waktu untuk berbagai suhu air masuk dengan kecepatan aliran massa 0,0221 kg/detik. Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa makin tinggi suhu air masuk makin besar akumulasi panas yang tersimpan pada PCM (pada waktu 100 menit : $T_1 = 60^\circ\text{C}$, $E(t) = 21,1$ kW.menit; $T_1 = 68^\circ\text{C}$, $E(t) = 31,05$ kW.menit; $T_1 = 70^\circ\text{C}$, $E(t) = 34,23$ kW.menit) karena dengan makin tingginya suhu air masuk maka kecepatan perpindahan panas dari air ke PCM makin besar. Pengaruh perbedaan kecepatan aliran massa air untuk suhu masuk tetap dan pengaruh perbedaan suhu air masuk untuk kecepatan aliran massa air tetap terhadap akumulasi panas menunjukkan kecenderungan yang sama.



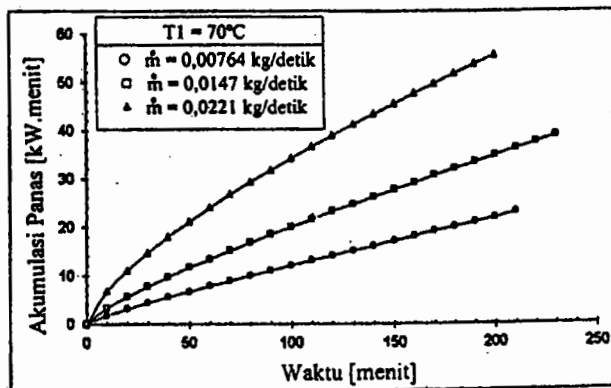
Gambar 9. Pengaruh suhu air masuk terhadap akumulasi panas.



Gambar 7. Pengaruh suhu air masuk terhadap kecepatan perpindahan panas.



Gambar 10. Jari-jari PCM yang telah melebur sebagai fungsi waktu.



Gambar 8. Pengaruh kecepatan aliran massa air terhadap akumulasi panas.

Kecepatan peleburan PCM diamati secara visual dengan mencatat jari-jari batas antara PCM yang telah melebur dan PCM padat sebagai fungsi waktu. Hasil pengamatan untuk operasi dengan kecepatan aliran massa air 0,0147 kg/detik dan suhu air masuk 70°C ditunjukkan pada gambar 10. Dari gambar 10 dapat dilihat bahwa kecepatan peleburan arah ke atas dan ke bawah tidak sama. Pada awal proses perbedaan kecepatan peleburan ke atas dan ke bawah tidak begitu kelihatan, tetapi perbedaan itu semakin kentara dengan bertambahnya waktu. Hal ini karena dengan bertambahnya waktu berarti jumlah PCM yang mencair menjadi bertambah dan terjadi aliran konveksi pada cairan PCM. PCM cair yang bersuhu tinggi cenderung naik ke atas dan memberikan panasnya pada PCM padat yang digunakan untuk meleburkannya. PCM cair yang telah memberikan panasnya, maka suhunya turun sehingga mengalir secara konveksi ke bawah. Karena itu kecepatan

peleburan ke atas lebih besar dari kecepatan peleburan ke bawah. Gerakan naik turun PCM cair ini disebabkan adanya perubahan densitas PCM cair itu. PCM cair panas mempunyai densitas yang lebih kecil dibandingkan dengan PCM cair yang lebih dingin, sehingga terjadi aliran cairan panas ke atas dan cairan dingin ke atas. Gambar 10 juga menunjukkan bahwa kecepatan peleburan pada *inlet* alat (A) lebih besar dari kecepatan peleburan pada *outlet* alat (B) karena suhu air pada *inlet* lebih besar dari pada *outlet*. Pada kedua posisi itu ditunjukkan kecenderungan kecepatan peleburan yang sama.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Kecepatan perpindahan panas dari sumber panas (air) ke PCM dan jumlah energi terakumulasi (tersimpan) di PCM dapat ditingkatkan dengan menaikkan suhu air masuk dan atau menaikkan kecepatan aliran massanya.
2. Aliran konveksi pada PCM yang telah lebur memperbesar kecepatan transfer panas dari sumber panas ke PCM.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Proyek Pengkajian dan Penelitian Ilmu Pengetahuan Dasar (PPIPD) atas biaya yang diberikan untuk pelaksanaan penelitian ini melalui kontrak No. 27/PPIPD/DPPM/97/PPIPD/ 1997 tanggal 10 Juni 1997 yang dikelola oleh Dit. Binlitabmas, Ditjen Dikti, Depdikbud. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian UGM untuk segala bantuannya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Akhirnya ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Sdr. William Morton S. dan semua pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR LAMBANG

C = kapasitas panas (kJ/kg °C)

E = akumulasi energi panas tersimpan (kJ)
 k = konduktivitas panas (W/m °C)
 L = panas laten peleburan (kJ/kg)
 m = kecepatan aliram massa (kg/detik)
 M = massa (kg)
 Q = kecepatan transfer panas (W)
 t = waktu (detik)
 T = suhu (°C)
 V = volum (m³)
 ρ = berat jenis (kg/m³)

Indek

i = keadaan awal
 l = cairan
 m = leleh
 p = paraffin
 s = padatan
 w = air
 wal l= dinding

DAFTAR PUSTAKA

- Farid, M., Kim, Y., Honda, T., and Kanzawa, A., 1989, "The Role of Natural Convection During Melting and Solidification of PCM in Vertical Cylinder", *Chem. Eng. Comm*, 8, 43-60.
- Farid, M., Kim, Y., and Kanzawa, A., 1990, "Thermal Performance of a Heat Storage Module Using PCM's with Different Melting Temperatures : Experimental", *Trans. ASME, J., Solar Energy Eng.*, 112, 125-131.
- Ryu, H.W., Hong, S.A., Shin, B.C., and Kim, S.D., 1991, "Heat Transfer Characteristics of Cool-Thermal Storage Systems", *Energy*, 16(4), 727-737.
- Watanabe, T., Kikuchi, H., and Kanzawa, A., 1993, "Enhancement of Charging and Discharging Rates in a Latent Heat Storage System by Use of PCM with Different Melting Temperatures", *Heat Recovery Systems & CHP*, 13(1), 57-66.
- Yanadori, M. and Matsuda, T., 1986, "Heat Transferential Study on a Heat Storage Container with Phase Change Material", *Solar Energy*, 36(2), 169-177.